

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
11. Januar 2001 (11.01.2001)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 01/03256 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: H01S 3/032,
3/0975 // H05H 1/14

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP00/06195

(22) Internationales Anmeldedatum:
3. Juli 2000 (03.07.2000)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
199 30 755.5 2. Juli 1999 (02.07.1999) DE

(71) Anmelder und

(72) Erfinder: CHRISTIANSEN, Jens [DE/DE]; An den
Hornwiesen 4, D-91054 Buckenhof (DE). CHRIS-
TIANSEN, Kai [DE/DE]; An den Hornwiesen 4,
D-91054 Buckenhof (DE). JACOBY, Joachim [DE/DE];
Die Gwänden 3, D-91388 Igensdorf (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): CHRISTIANSEN,
Silke [DE/DE]; An den Hornwiesen 4, D-91054 Bucken-
hof (DE).

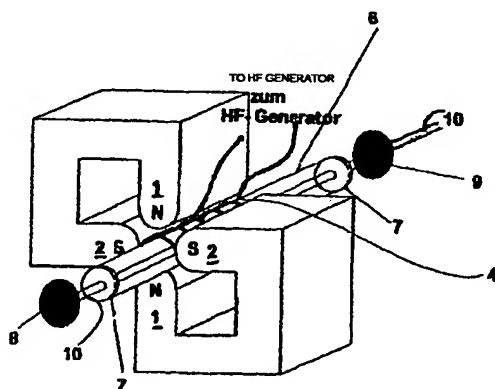
(74) Anwälte: TWELMEIER, Ulrich usw.; Zerrenerstrasse
23-25, D-75172 Pforzheim (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (national): DE, JP, US.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

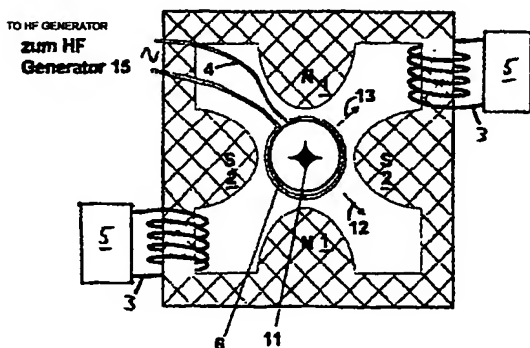
(54) Title: GAS LASER

(54) Bezeichnung: GASLASER



(57) Abstract: The invention relates to a gas laser, comprising a container (6) for holding a gas or a gas mixture as the laser medium, said container (6) having an axis (14) in whose direction the gas laser emits its laser radiation; means for producing a plasma in the container (6) and means for generating a magnetic field in the container (6). According to the invention, a group of at least two magnetic pole pairs is provided. The poles (1, 2) of said magnetic pole pairs extend along the axis (14), at a distance from said axis (14), and are arranged around the axis (14) with alternating polarity, in such a way that the resulting magnetic field has a sink in the area of the axis (14) and in such a way that the means for producing the plasma contain a source for an electromagnetic alternating field, which is allocated to the container (6).

(57) Zusammenfassung: Beschrieben wird ein Gaslaser mit einem Gefäß (6) zum Aufnehmen eines Gases oder eines Gasgemisches als laseraktives Medium, wobei das Gefäß (6) eine Achse (14) hat, in dessen Richtung der Gaslaser seine Laserstrahlung emittiert, mit Mitteln zum Erzeugen eines Plasmas in dem Gefäß (6) und mit Mitteln zum Erzeugen eines magnetischen Feldes in dem Gefäß (6). Erfindungsgemäß ist vorgesehen, daß eine Gruppe aus wenigstens zwei Magnetpolpaaren vorgesehen ist, deren Pole (1, 2) sich mit Abstand von der Achse (14) längs der Achse (14) erstrecken und mit alternierender Polarität derart um die Achse (14) herum angeordnet sind, daß das von ihnen ausgehende Magnetfeld im Bereich der Achse (14) eine Senke hat, und daß die Mittel zum Erzeugen des Plasmas eine Quelle für ein elektromagnetisches Wechselfeld beinhalten, welche dem Gefäß (6) zugeordnet ist.



WO 01/03256 A1



(84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes, und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Veröffentlicht:

- Mit internationalem Recherchenbericht.
- Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen.

Gaslaser

Technisches Gebiet:

Die Erfindung geht aus von einem Gaslaser mit einem Gefäß zum Aufnehmen eines Gases oder eines Gasgemisches als laseraktives Medium, wobei das Gefäß eine Achse hat, in dessen Richtung der Gaslaser seine Laserstrahlung emittiert, mit Mitteln zum Erzeugen eines Plasmas in dem Gefäß und mit Mitteln zum Erzeugen eines magnetischen Feldes in dem Gefäß. Ein solcher Gaslaser ist aus F.K. Kneubühl, M. W. Sigrist "Laser" Verlag B.G. Teubner Stuttgart 1988, Seiten 232 bis 271 bekannt.

Erfindungsgemäß geht es insbesondere um Edelgaslaser, z.B. Helium-Neon-Laser, um Ionenlaser, insbesondere Argonionenlaser, und um Moleküllaser, insbesondere CO₂-Laser.

Stand der Technik:

Die Anregung des aktiven Mediums in einem Gaslaser geschieht gewöhnlich durch eine elektrische Entladung. In einer elektrischen Gasentladung werden freie Elektronen und Ionen erzeugt. Diese Ladungsträger gewinnen durch die Beschleunigung im elektrischen Feld der Gasentladung kinetische Energie. Die gewonnene kinetische Energie der Elektronen kann durch inelastische Stöße auf andere Gasteilchen übertragen werden und diese in höhere Niveaus anregen. Die Bewegung der Ionen ist im allgemeinen unwichtig, da nur die freien Elektronen zur Anregung der Gasatome, Gasionen oder Moleküle beitragen. Aus den höheren Niveaus kann es dann zu einer stimulierten Emission von Strahlung kommen.

Der Helium-Neon-Laser ist ein Neutralatom-Gaslaser, in welchem eine Gleichstrom- oder Hochfrequenz - Entladung gezündet wird, um ein laseraktives Plasma zu erhalten. Der Wirkungsgrad des Lasers, definiert als Quotient aus optischer Leistung und elektrischer Eingangsleistung, beträgt typisch nur 0,1 %. Der Grund liegt unter anderem im ziemlich ineffizienten Anregungsmechanismus (Kneubühl / Sigrist, a.a.O. Seite 240).

Ein typischer Argonionenlaser enthält in einem als Röhre ausgebildeten Gefäß eine kaskadenartige Elektrodenanordnung, zwischen deren Elektroden in der Gasfüllung, welche typisch einen Gasdruck von 0,01 - 1 mbar aufweist, eine Hochstrombogenentladung gezündet wird, um ein laseraktives Plasma mit einem Ionsationsgrad in der Größenordnung von 10^{-4} bis 10^{-2} zu erhalten. Auch bei einem Argonionenlaser ist der Wirkungsgrad mit weniger als 0,1 % sehr klein. Die Strahlqualität, z.B. der Jitter des Strahls sowie seine maximale Intensität hängen vom Alter der Röhre ab. Infolge der Wechselwirkung des Plasmas mit der Röhre ist deren Lebensdauer stark eingeschränkt, sie beträgt bei 20 W Laserleistung typisch nur 2000 Stunden. Danach muß die Röhre, welche einige zehntausend Deutsche Mark kostet, ersetzt werden. Außerdem bedarf die Röhre einer

intensiven Kühlung, die Kühlleistung beträgt typisch bis zu 40 kW. Es ist bekannt, bei einem Argonionenlaser ein longitudinales Magnetfeld anzulegen, also ein Magnetfeld, welches parallel zur Längsachse der Röhre des Lasers verläuft, um die Entladung auf die Achse zu konzentrieren und die schädlichen Effekte des Plasmas auf die Wand der Röhre zu verringern. (Kneubühl / Sigrist, a.a.O. Seite 246) Die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist jedoch gering und hat nicht dazu geführt, den Wirkungsgrad des Lasers über 0,1 % anzuheben.

CO₂ - Laser werden je nach Bauart durch Gleichstromentladungen oder durch elektromagnetische Felder im Radiofrequenzbereich angeregt. Ihr Wirkungsgrad liegt je nach Bau- und Betriebsart typisch bei 10 % bis 15 %.

Der vorliegenden Erfindung liegt die **Aufgabe** zugrunde, bei Gaslasern den Wirkungsgrad und die Lebensdauer des Gefäßes, welches das laseraktive Medium umgibt, zu verlängern.

Diese Aufgabe wird gelöst durch einen Gaslaser mit den im Patentanspruch 1 angegebenen Merkmalen. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Darstellung der Erfindung:

Erfindungsgemäße Gaslaser haben ein Gefäß zum Aufnehmen eines Gases oder eines Gasgemisches als laseraktives Medium, wobei das Gefäß eine Achse hat, in dessen Richtung der Gaslaser seine Laserstrahlung emittiert. Zum Anregen des laseraktiven Mediums wird mit einer dem Gefäß zugeordneten Quelle für ein elektromagnetisches Wechselfeld ein Plasma erzeugt, in dem das elektromagnetische Wechselfeld in das laseraktive Medium in dem Gefäß eingekoppelt wird. Zum Erzeugen eines magnetischen Feldes in dem Gefäß ist eine Gruppe aus

wenigstens zwei Magnetpolpaaren vorgesehen, deren Pole sich mit Abstand von der Achse des Gefäßes längs der Achse erstrecken und mit alternierender Polarität derart um die Achse herum angeordnet sind, daß das von ihnen ausgehende Magnetfeld im Bereich der Achse eine Senke hat. Es wird eine Plasmasäule erzeugt, die den wesentlichen Teil des laseraktiven Volumens darstellt, dessen geometrische Dimensionen bestimmt werden durch den Einschluß des Plasmas in einem statischen oder langsam veränderlichen magnetischen Multipolfeld. Durch die eingestrahlte bzw. eingekoppelte Energie aus dem elektromagnetischen Wechselfeld werden im Plasma elektrische Felder mit azimuthalen oder achsparallelen Komponenten erzeugt, die in dem magnetischen Multipolfeld zu einer Verdichtung des Plasmas führen.

Das hat wesentliche Vorteile:

- ♦ Durch die Wechselwirkung der im Plasma vorliegenden Ladungsträger mit dem Magnetfeld und mit dem elektromagnetischen Wechselfeld werden die Ladungsträger, insbesondere die Elektronen, von der Wand des Gefäßes weg zu dessen Achse hingetrieben, wo das Magnetfeld eine Senke hat und vorzugsweise verschwindet. Dadurch wird die Wechselwirkung des Plasmas mit der Wand des Gefäßes stark vermindert.
- ♦ Die Verminderung der Wechselwirkung des Plasmas mit der Wand des Gefäßes verlängert die Lebensdauer des Gefäßes.
- ♦ Die Verminderung der Wechselwirkung des Plasmas mit der Wand des Gefäßes verringert die Aufheizung der Gefäßwand und verringert damit den Bedarf an Kühlleistung.
- ♦ Die Verringerung der Wechselwirkung des Plasmas mit der Wand des Gefäßes verringert die Absorption von Bestandteilen des Gases durch die Gefäßwand und hält deshalb die optimale Zusammensetzung und den optimalen Druck des Gases über längere Zeit aufrecht.

- ♦ Durch eine geringere Wechselwirkung der Elektronen des Plasmas mit der Wand des Gefäßes stehen mehr und energiereichere Elektronen für Stöße zur Anregung des Gases zur Verfügung, was eine Erhöhung des Wirkungsgrades des Lasers zur Folge hat.
- ♦ Dadurch, daß die Elektronen des Plasmas in die Senke des Magnetfeldes getrieben werden, steigt dort die Elektronendichte und die Stoßwahrscheinlichkeit für die Elektronen an, so daß die Strahlungsausbeute und mit ihr der Wirkungsgrad des Lasers steigt. Erste Versuche haben gezeigt, daß sich der Wirkungsgrad z.B. eines Argon-Ionenlasers gegenüber dem Stand der Technik um den Faktor zehn bis zwanzig steigern läßt.
- ♦ Durch die Konzentration der die Anregung verursachenden Elektronen auf den nahen Umgebungsbereich der Achse des Gefäßes wird der Bereich, welcher Laserstrahlung aussendet, schlanker und dadurch der Laserstrahl dünner und intensiver.
- ♦ Dadurch, daß die Wechselwirkung des Plasmas mit der Wand des Gefäßes verringert und die Elektronendichte im nahen Umgebungsbereich der Achse des Gefäßes erhöht wird, kommt es dort zu einem Anstieg der Elektronentemperatur (der kinetischen Energie der Elektronen), welche durch eine Erhöhung der Amplitude des elektromagnetischen Wechselfeldes noch weiter gesteigert werden kann. Eine Erhöhung der Amplitude des elektromagnetischen Wechselfeldes wird ihrerseits durch die verringerte Wechselwirkung des Plasmas mit der Wand des Gefäßes erleichtert.
- ♦ Die Erfindung ermöglicht eine höhere Elektronentemperatur, welche ihrerseits die Anregung höherer Energieniveaus und damit Laserstrahlung mit kürzerer Wellenlänge bis in den Bereich der Röntgenstrahlung hinein ermöglicht.
- ♦ Die hohe, mit relativ geringer HF-Leistung erreichbare Elektronentemperatur führt zu einer energetisch wesentlich niedrigeren Anschwingschwelle des Lasers.

- ♦ Mit der Erfindung lassen sich im Gefäß des Lasers Plasmen erzeugen, in welchen in an sich erwünschter Weise die Elektronentemperatur sehr viel höher ist als die Ionentemperatur.
- ♦ Die Verminderung der Wechselwirkung des Plasmas mit der Wand des Gefäßes erlaubt die Verwendung von Gefäßen aus Werkstoffen, welche weniger widerstandsfähig, weniger temperaturbeständig, weniger giftig und preiswerter sind als das für Argonionenlaser häufig verwendete Berylliumoxid.

Das Magnetfeld, welches in Verbindung mit dem elektromagnetischen Wechselfeld das Plasma und insbesondere dessen Elektronen in der Senke des Magnetfeldes konzentriert, ist um so wirksamer, je größer sein quer zur Achse des Gefäßes verlaufender Gradient ist. Deshalb ist es günstig, wenn das Magnetfeld im Bereich der Achse des Gefäßes verschwindet und am Rand des Gefäßes möglichst hoch ist, wobei der Höhe des Magnetfeldes nur technische Grenzen im Erzeugen des Magnetfeldes und finanzielle Grenzen gesetzt sind. Aus Kostengründen wird man Magnetfelder mit einer Stärke von mehr als 10 Tesla nicht verwenden; ein guter Kompromiß aus der Stärke des Magnetfeldes und den Kosten zu seiner Erzeugung stellen Magnetfelder mit einer Stärke zwischen 0,1 und 2 Tesla an der Polschuhoberfläche, insbesondere zwischen 0,1 und 1 Tesla dar.

Grundsätzlich könnten die Magnetpole in dem Gefäß des Lasers liegen, vorzugsweise liegen sie aber außerhalb des Gefäßes. Grundsätzlich könnte es sich bei den Magneten um Permanentmagneten handeln. Wegen der erreichbaren höheren Feldstärken werden jedoch Elektromagneten bevorzugt. Diese können durch Gleichstrom oder durch Wechselstrom erregt werden, insbesondere durch Wechselstrom, welcher in Europa standardmäßig mit 50 Hz und in den USA standardmäßig mit 60 Hz zur Verfügung steht, wodurch sich ein preiswerter Magnetaufbau ergibt. Wenn die Elektromagnete nicht durch Gleichstrom, sondern durch

Wechselstrom erregt werden, soll die Frequenz des erregenden Wechselstroms jedoch klein gegen die Frequenz des elektromagnetischen Wechselfeldes sein, welches verwendet wird, um das Plasma zu erzeugen und das laseraktive Medium anzuregen, denn für die angestrebte fokussierende Wirkung des Magnetfeldes ist es am besten, wenn es im Vergleich zur Frequenz des elektromagnetischen Wechselfeldes zum Erzeugen des Plasmas nur langsam veränderlich oder quasi-statisch ist.

Zweckmäßigerweise werden die Elektronen des Plasmas durch ihre Wechselwirkung mit dem Magnetfeld und mit dem elektromagnetischen Wechselfeld auf einen im wesentlichen geradlinigen Bereich konzentriert, in dessen Längsrichtung die Laserstrahlung emittiert wird. Deshalb wird es bevorzugt, daß die Achse, in deren nahen Umgebungsbereich die Elektronen konzentriert werden, sowohl eine Symmetrieachse der Anordnung aus den Magnetpolpaaren als auch eine Symmetrieachse des Gefäßes ist.

Am einfachsten ist das Gefäß eine Röhre, insbesondere eine solche mit kreisförmigem Querschnitt. Es sind aber durchaus auch Röhren mit rechteckigem oder quadratischem Querschnitt möglich, oder auch mit einem Querschnitt, welcher dem Querschnitt der leuchtenden Plasmasäule entspricht, welche durch die Wechselwirkung des Plasmas mit dem Magnetfeld und dem elektromagnetischen Wechselfeld entsteht (siehe z.B. Figur 2).

In der bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird ein magnetisches Vierpolfeld (Quadrupolfeld) erzeugt, welches auf der Achse des Gefäßes des Lasers eine Senke hat. In diesem Fall sind zwei Magnetpolpaare vorzugsweise symmetrisch um die Achse des Gefäßes herum angeordnet. Es ist aber auch möglich, mit einem Sechspolfeld oder mit einem Achtpolfeld zu arbeiten. Mit mehr als acht Magnetpolen, welche um die Achse herum angeordnet sind, zu arbeiten, bringt

weiteren Aufwand, aber keinen relevanten Vorteil, so daß bevorzugt wird, nicht mehr als acht Pole (vier Magnetpolpaare) um die Achse herum anzuordnen.

Die Magnete können Polschuhe haben, welche sich durchgehend über die gesamte Länge des für die Anregung des Gases vorgesehenen Raumes im Gefäß des Lasers erstrecken. Bei größeren Längen kann es jedoch technisch einfacher und vorteilhafter sein, in Richtung der Achse des Gefäßes mehrere Gruppen von Magnetpolpaaren hintereinander anzuordnen, wobei die Gruppen untereinander zweckmäßigerweise gleich sind.

Das elektromagnetische Wechselfeld, dessen Aufgabe es ist, ein Plasma zu erzeugen, dessen Elektronen in dem elektromagnetischen Wechselfeld genügend Energie aufnehmen können, um in dem laserfähigen Gas die gewünschten Energieniveaus anzuregen, kann auf unterschiedliche Weise erzeugt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, als Quelle des elektromagnetischen Wechselfeldes eine Spule zu verwenden, die das Gefäß umgibt und Bestandteil eines elektrischen Schwingkreises ist, welcher von einem Frequenzgenerator gespeist wird. Vorzugsweise umgibt die Spule das Gefäß nur auf einem Teil seiner Länge, damit das zum Leuchten angeregte Plasma nicht nur von der Umfangswand des Gefäßes des Lasers, sondern auch von dessen beiden Endwänden ferngehalten wird, um auch die Belastung der Endwände des Gefäßes kleinzuhalten und um die Verluste an Ladungsträgern des Plasmas infolge eines Auftreffens der Ladungsträger auf die Endwände des Gefäßes kleinzuhalten. Die Windungen der Spule, welche zweckmäßigerweise außerhalb des Gefäßes des Gaslasers angeordnet ist, sollen aber den Achsenbereich des von den Polen ausgehenden Multipolfeldes umschließen.

Eine andere Möglichkeit, im Gefäß ein elektromagnetisches Wechselfeld zu erzeugen, besteht darin, zwei oder mehr als zwei Elektroden in dem Gefäß vorzusehen und zum Bestandteil eines elektrischen Schwingkreises zu machen, welcher

von einem Frequenzgenerator gespeist wird. In diesem Fall findet die Gasentladung und die damit einhergehende Plasmabildung zwischen den Elektroden statt. Um die in diesem Bereich entstehende Laserstrahlung auskoppeln zu können, haben die Elektroden zweckmäßigerweise im Achsenbereich des Multipolfeldes jeweils ein Loch, eine Ausnehmung, eine Perforation oder dergleichen Durchgang, durch den das Laserlicht hindurchtreten und schließlich das Gefäß durch ein Auskoppelfenster verlassen kann.

Eine Kombination dieser beiden Möglichkeiten, bei der eine Mischung von azimuthaler und longitudinaler Anregung des Plasmas erfolgt (Anspruch 22), ist ebenfalls möglich und hat den Vorteil, daß die eingekoppelte Leistung erhöht wird.

Das elektromagnetische Wechselfeld kann ein Niederfrequenzfeld, ein Hochfrequenzfeld oder ein Mikrowellenfeld sein. Die Frequenz des elektromagnetischen Wechselfeldes sollte mindestens 50 Hz betragen. Bevorzugt werden Frequenzen vom kHz-Bereich bis in den GHz-Bereich hinein.

Quelle des elektromagnetischen Wechselfeldes kann auch eine frequenzangepaßte und dadurch resonanzfähige Kavität sein, die den Raumbereich des laseraktiven Plasmas umschließt und Bestandteil eines Hochfrequenzgenerators oder eines Mikrowellengenerators ist. Hohlraumresonatoren, die für diesen Zweck geeignet sind, sind von ihrem Grundaufbau her in der Mikrowellentechnik bekannt.

Die Erfindung eignet sich sowohl für kontinuierlich betriebene Laser (CW-Laser) als auch für gepulst betriebene Laser. Bei einem gepulst betriebenen Laser ist es vorteilhaft, Mittel zum permanenten Erzeugen einer Gasentladung in Kombination mit Mitteln für eine gepulste Energiezufuhr in das Plasma vorzusehen, so daß der permanenten Gasentladung, insbesondere einer Hochfrequenz- oder Mikrowellengasentladung, eine gepulste Energiezufuhr in das Plasma überlagert werden kann, welche erst die für das Aussenden von Laserlicht erforderliche

Besetzungsinversion der höheren Energieniveaus erzeugt. Die permanente HF-Entladung führt zu einer hohen Vorionisierung des Gases und in weiterer Folge zu besonders homogenen Plasmen. Diese Ausführungsform der Erfindung eignet sich besonders für UV-Laser.

Für den gepulsten Betrieb des Lasers sind im Gefäß des Lasers zweckmäßigerweise Elektroden vorgesehen, welche die Länge der Plasmasäule im Gefäß beschränken und sich in einem Schaltkreis befinden, in welchem ein aufladbarer Kondensator über einen schnellen elektronischen Schalter und über die Elektroden entladen werden kann. Als schneller elektronischer Schalter eignet sich ein Thyatron, ein Thyristor oder ein Pseudofunkenschalter. Ein geeigneter Pseudofunkenschalter ist in der EP 0 324 817 B2 offenbart. Anstelle der Elektroden kann auch eine das Gefäß des Lasers umgebende Spule vorgesehen sein, über welche der Kondensator des Schaltkreises entladen wird.

Als Füllungen für das Lasergefäß kommen vor allem Edelgase und Mischungen von Edelgasen aus der Gruppe Helium, Neon, Argon, Xenon und Krypton, darüber hinaus auch Kohlendioxid, jeweils mit den üblichen Beimischungen in Frage. Vorzugsweise enthält der Kohlendioxid-Laser noch Stickstoff und Helium oder Stickstoff und Neon und wird zum Erzeugen von Laserstrahlung mit Wellenlängen von 9,4 μm und 10,4 μm verwendet. Bei höheren Leistungen wird die Gasfüllung im CO_2 -Laser zweckmäßigerweise umgewälzt und gekühlt, wobei das den Teil des Gefäßes, in welchem die Gasentladung stattfindet, entweder longitudinal oder transversal durchströmt. Bei einer Edelgasfüllung, insbesondere bei einem Argonionenlaser können durch die hohen Elektronentemperaturen (kinetische Elektronenenergie), welche die Erfindung ermöglicht, auch Laserübergänge in einfach oder mehrfach geladenen Ionen angeregt und dadurch besonders kurzwellige Laserstrahlen erzeugt werden. Eine weitere Frequenzerhöhung ist möglich durch Frequenzverdoppelung oder Frequenzvervielfachung der emittierten

Laserstrahlung mit Mitteln der nichtlinearen Optik. Durch nichtlineare optische Kristalle lassen sich nämlich Oberwellen der in den Kristall eingestrahlten Strahlung erzeugen, was bei UV-Lasern zur Frequenzverdoppelung an sich bekannt ist. Näheres zur Technik der Frequenzvervielfachung kann nachgelesen werden bei Y. R. Shen "The Principles of non linear Optics", Wiley Verlag, N. Y., 1984.

Mit den erfindungsgemäß möglichen hohen Elektronentemperaturen und mit einer Frequenzvervielfachung kann man in einen Bereich vorstoßen, in welchem erfindungsgemäße Gaslaser als Röntgenlaser arbeiten. Solche Laser eignen sich besonders für das Bearbeiten und Erzeugen von sehr feinen Strukturen, auch für dif-
fizile medizinische Operationen, insbesondere am Auge, und für
Hautbehandlungen.

Beschreibung der Erfindung anhand der Abbildungen:

Figur 1 zeigt eine Anordnung der für die Erfindung wichtigsten Elemente eines Gaslasers in einer Schrägansicht für den Fall der Anregung des Plasmas durch eine Spule,

Figur 2 zeigt ein typisches Scan-Bild eines Originalphotos des Plasmaleuchtens in einem solchen Laser,

Figur 3 ist eine schematische Darstellung zur Illustrierung der in einem Vierpolfeld auftretenden Elektronenbahnen nach Anhang A1,

Figur 4a zeigt einen Längsschnitt durch einen Gaslaser, welcher ähnlich aufgebaut ist wie der in Figur 1 dargestellte,

Figur 4b zeigt einen Querschnitt durch den Laser aus Figur 4a,

Figur 5a zeigt eine Möglichkeit zur Hochfrequenz-Einkopplung in das Gefäß eines Gaslasers mittels einer das Gefäß umgehenden Spule,

Figur 5b zeigt die Möglichkeit einer Hochfrequenz-Einkopplung in das Gefäß eines Gaslasers durch im Gefäß angeordnete Elektroden,

Figur 5c und 5d zeigen zwei Möglichkeiten zur impulsförmigen Anregung des Plasmas,

Figur 5e zeigt eine Möglichkeit zur gemischten azimuthalen und longitudinalen HF-Anregung des Plasmas, und die

Figur 6 zeigt einen CO₂-Laser mit Gasumwälzung.

Gleiche oder einander entsprechende Teile sind in den verschiedenen Figuren mit übereinstimmenden Bezugszahlen bezeichnet.

Figur 1 zeigt einen Gaslaser mit einem Gefäß 6 in Gestalt einer zylindrischen Röhre aus Glas oder Keramik, welche an ihren Enden durch Auskopplungsfenster 7 verschlossen ist, bei denen es sich vorzugsweise um Brewsterfenster handelt. In einem Abstand von dem einen Fenster ist ein Hohlspiegel 8 und in einem Abstand vom gegenüberliegenden Fenster 7 ein teildurchlässiger ebener Spiegel 9 angeordnet. Auf einem Teil ihrer Länge ist das Gefäß 6 von einer Spule 4 umgeben, welche mit einem Hochfrequenzgenerator 15 (Figuren 5a und 5b) verbunden ist. Die Spule 4 dient zum Einkoppeln eines elektromagnetischen Hochfrequenzfeldes. In demselben Bereich, in welchem das Gefäß 6 von der Spule 4 umgeben ist, ist um das Gefäß 6 herum auch eine Gruppe von vier Magnetpolen 1 und 2 angeordnet, deren Polschuhe parallel zur Längsachse (z-Achse) 14 des Gefäßes 6 verlaufen und mit alternierender Polarität, wie angeordnet, ein Vierpolfeld

erzeugen, welches auf der Achse 14 verschwindet. Im einfachsten Fall können die Magnete Dauermagnete sein, vorzugsweise handelt es sich doch um Elektromagnete, welche durch Wicklungen erregt werden, die sich in geeigneter Weise auf den Schenkeln des Magnetes befinden können.

Das in den Figuren 4a und 4b dargestellte Ausführungsbeispiel unterscheidet sich von dem in Figur 1 dargestellten Ausführungsbeispiel im wesentlichen nur darin, daß die vier Magnetpole 1 und 2 nicht zwei getrennten Magneten, sondern einer einzigen, geschlossenen Magnetanordnung angehören, welche mittels einer Gleich- oder Wechselstromquelle 5 durch zwei Wicklungen 3 erregt wird.

Durch Einkoppeln eines elektromagnetischen Hochfrequenzfeldes mittels der Spule 4 in die Gasfüllung des Gefäßes 6 entsteht darin eine Hochfrequenzentladung, durch die ein Plasma entsteht, dessen Elektronen durch die Wechselwirkung mit dem Hochfrequenzfeld und mit dem Magnetfeld, welches ein statisches Magnetfeld oder ein langsam veränderliches Magnetfeld sein kann, über die Länge der Spule 4 auf den nahen Umgebungsbereich der Achse 14 konzentriert wird. Die in diesem nahen Umgebungsbereich der Achse 14 konzentrierte Plasmasäule ist es, welche mit Hilfe der beiden Spiegel 8 und 9 zum Aussenden eines Laserstrahls 10 angeregt wird.

Figur 2 zeigt das Scan-Bild des laseraktiven Plasmas für einen Neon-Laser, welcher mit 40 W elektrischer Energie bei 40 MHz angeregt wurde, mit einem Polschuhabstand von 3 cm. Das Bild läßt deutlich die Einschnürung des laseraktiven Plasmas auf den Bereich der z-Achse 14 erkennen. Der Diagonaldurchmesser der leuchtenden Plasmasäule wurde zu 2,8 mm bestimmt. Als Diagonaldurchmesser wird der Durchmesser der Plasmasäule in Richtung der x-Achse 12 oder der y-Achse 13 (siehe Figur 4b) bezeichnet. In Figur 4a ist die Einschnürung mit Hilfe einer Rasterung dargestellt, in Figur 4b ist die für ein Vierpolfeld typische

Querschnittsform der leuchtenden Plasmasäule in guter Übereinstimmung mit dem Scan-Bild aus Figur 2 dargestellt. Der Diagonaldurchmesser des Gasgefäßes betrug 2,6 cm, so daß der Durchmesser der leuchtenden Plasmasäule nur etwa 1/10 des Durchmessers des Gefäßes 6 beträgt. Die Aufnahme wurde bei einer Anregung mit 40 MHz und einer HF-Leistung von 40 W bei einer Länge der Quadrupol-Anordnung von 10 cm gemacht. Auf den theoretischen Wert des Diagonaldurchmessers der Plasmasäule 11 (Figur 4a) wird im Anhang A1 bezug genommen.

Die Figuren 5a bis 5d zeigen Möglichkeiten der HF-Einkopplung. In allen vier Figuren sind die Gefäße 6 gezeichnet, in welchen die Entladung stattfindet. Außerdem ist jeweils die Lage der leuchtenden Plasmasäule 11 angedeutet. Mit Ausnahme der für die Anregung erforderlichen Bauteile sind die übrigen Bestandteile des Gaslasers (Spiegel, die magnetische Multipolanordnung, die Auskoppelfenster) nicht dargestellt.

Gemäß Figur 5a ist das Gefäß 6, wie in Figur 1 dargestellt, von einer Spule 4 umgeben, die Bestandteil eines Schwingkreises mit dem Kondensator 18 ist. Der Schwingkreis wird durch einen HF-Generator 15 gespeist.

Gemäß Figur 5b sind in dem Gefäß 6 zwei Paare von Elektroden 16 und 17 angeordnet, welche Bestandteil eines Schwingkreises mit einer in Reihe liegenden Spule 19 und mit einem parallel liegenden Kondensator 18 sind. Der Schwingkreis wird durch einen HF-Generator 15 gespeist. Die Elektroden sind durchbrochen, um den Durchtritt von Laserstrahlung zu ermöglichen. In einem verwirklichten Ausführungsbeispiel wurden die Elektroden als Hohlzylinder ausgebildet.

In Figur 5c ist eine Anordnung für einen pulsförmigen Betrieb eines Gaslasers dargestellt. Das Gefäß 6 ist von einer Spule 20 umgeben, über welche ein

Ladekondensator 21 über einen schnellen elektronischen Schalter 22 entladen werden kann. Der Schalter 22 ermöglicht einen pulsformigen Betrieb. Zum Laden des Ladekondensators 21 ist ein Ladegerät 23 vorgesehen.

Figur 5d unterscheidet sich von Figur 5c darin, daß die Spule 20 entfallen ist. Stattdessen sind im Gefäß 6 zwei Elektroden 24 und 25 angeordnet, über welche der Ladekondensator 21 entladen werden kann.

Die in Figur 5d dargestellte Anordnung kann ergänzt werden um eine Einrichtung für eine permanente Gasentladung derart, wie sie in Figur 5a dargestellt ist. Bei einer solchen Kombination kann das Gas im Gefäß 6 durch die permanente Gasentladung vorionisiert und durch die in Figur 5d dargestellte Schaltung schließlich gezündet werden. Dies entspricht der Arbeitsweise gemäß Patentanspruch 30.

Die in Figur 5e dargestellte Anordnung unterscheidet sich von der in Figur 5b dargestellten Anordnung darin, daß anstelle von zwei Elektrodenpaaren nur ein Elektrodenpaar 16, 17 vorgesehen ist und daß die Schwingkreisspule 19 die zwischen den Elektroden 16 und 17 verlaufende Plasmastrecke 34 im Gefäß 6 umgibt. In dieser Ausführungsform der Erfindung erfolgt eine gemischte HF-Anregung des Plasmas, nämlich sowohl eine azimutale als auch eine longitudinale Anregung. Bei dieser Art der Anregung verlaufen die im Plasma fließenden HF-Ströme und das elektrische HF-Feld spiralförmig. Die an den Elektroden 16 und 17 anliegende HF-Spannung wird wie im Ausführungsbeispiel der Figur 5c durch die Eigeninduktivität des Plasma-Stromes mitbestimmt. Der Vorteil besteht in einer Erhöhung der in das Plasma eingekoppelten Leistung.

Figur 6 zeigt schematisch den Aufbau eines CO₂-Lasers mit Gasumwälzung. Der Bereich 26, in welchem die Gasentladung stattfindet, wird, wie die Pfeile 27

andeuten, quer durchströmt. Die Darstellung ist so gewählt, daß die Achse 14, in deren Richtung Laserstrahlung emittiert wird, senkrecht zur Zeichenebene verläuft. Zur Umwälzung des Gases ist ein Gebläse 28 vorgesehen. Im Strömungsweg des Gases liegt ein Wärmetauscher 29, welcher zur Kühlung des Gases dient. Ferner ist eine Entnahmeleitung 30 vorgesehen, welche durch ein Ventil 31 absperrbar ist und durch welche Dissoziationsprodukte des CO_2 abgepumpt werden können. Durch eine Zuleitung 32, in welcher ein Absperrventil 33 liegt, kann eine frische Gasmischung, welche CO_2 und die weiteren gegebenenfalls vorgesehenen Beimischungen wie z.B. Stickstoff und Helium enthält, in den Kreislauf eingeführt werden.

Bei einem konventionellen CO_2 -Laser wird die Plasmasäule durch den im Gefäß 6 quer verlaufenden Gasfluß verbogen. Erfindungsgemäß wird die Plasmasäule jedoch, wie in Figur 6 dargestellt, durch die Konzentration der Elektronen auf den nahen Umgebungsbereich der Achse 14 konzentriert, so daß sich dort auch der laseraktive Teil des Plasmas befindet. Die im laseraktiven Plasma entstehenden Dissoziationsprodukte neigen dazu, im nahen Umgebungsbereich der Achse 14 zu verbleiben. Dem wirkt die quer zur Achse 14 verlaufende Umwälzung des Gases entgegen, welche deshalb vor einer longitudinalen, also längs der Achse 14 verlaufenden Umwälzung des Gases, welche ebenfalls möglich ist, vorteilhaft ist. Über die Entnahmeleitung 30 und die Zuleitung 32 können nicht nur Dissoziationsprodukte entfernt werden, sie bieten darüberhinaus die Möglichkeit, den Gasdruck im Gefäß 6 zu steuern oder zu regeln, und zwar am besten so, daß die mittlere Elektronentemperatur T_e im Plasma durch die Bedingung $kT_e = 0,3 \text{ eV}$ festgelegt ist, weil dieses sowohl für den Anregungsmechanismus als auch für den Wirkungsgrad des CO_2 -Lasers optimal ist. "k" ist die Boltzmannkonstante.

Beim Betrieb von erfindungsgemäßen Gaslasern mit Quadrupolmagnetanordnung wird folgendermaßen vorgegangen (siehe Figur 1):

Die Energiezufuhr in das laserfähige Gas erfolgt durch HF-Einkopplung oder Niederfrequenz-Einkopplung (evtl. elektrodenlos), z.B. 0,1-100 kW, Frequenzen ab 50Hz bis > 100 MHz für CW-Betrieb bzw. Hochleistungskopplung im Pulsbetrieb mit HF-Pulsen bis zu 100 MW (typisch um 1 MW).

Es erfolgt ein magnetischer Einschluß des durch die Hochfrequenz gebildeten HF-Plasmas durch ein magnetisches Quadrupolfeld (Figur 1). Entlang der Laserstrahlrichtung 14 hat dieses magnetische Feld eine frei wählbare Länge. Der Polschuhabstand beträgt typischerweise einige cm, die Magnetfeldanordnung kann mit Gleichstrom oder mit konventionellem Wechselstrom betrieben werden

Nach Überschreiten der Zündamplitude des HF-Feldes (bzw. des NF-Feldes) erfolgt eine Ladungsträgervermehrung und damit eine Aufheizung der Elektronenkomponente im Plasma fast ausschließlich innerhalb eines Raumgebietes mit einem Diagonaldurchmesser $D_{1/2} \approx$ einige Millimeter. Dieser Wert ändert sich nur mit der vierten Wurzel aus der Elektronentemperatur, für Laserbetrieb im Ar-Ionenlaser beträgt diese etwa $kT_e \approx 0,3-2$ eV (in Extremfällen bis ca. 10^2 eV). Figur 2 zeigt eine Photographie dieses Plasmas (40 MHz, Einstrahlung mit 40 W). Zur Erläuterung dieses Verhaltens ist ein vertiefter Einblick in die Funktionsweise der Ladungsträgervermehrung sowie Kenntnisse über die Elektronenbahnen im Feldbereich sowie über eine auftretende Kompression des Plasmas aufgrund radialer Kräfte, die durch die von der HF ausgelösten Teilchenströme entstehen, zweckmäßig. Diese werden in den Anhängen A1 bis A3 erläutert. Bei elektrodenloser (Figur 5a) induktiver oder kapazitiver Einkopplung der HF-Energie in das Plasmagebiet, aber auch bei Anbringung von Elektroden (Figur 5b) in diesem Gebiet läßt sich der Energieverlust an den Wänden sehr niedrig halten durch Minimierung der Plasma-Wand-Berührungsflächen, aber auch durch einen Betrieb des Gaslasers an der oberen Druckgrenze (siehe unten). Auf diese Weise wird die

vorhandene HF-Energie innerhalb eines engen Raumgebietes auf das Plasma übertragen und es ist möglich, in diesem eine hohe Elektronentemperatur zu erzeugen. Nach der SAHA-Gleichung ergibt sich daraus ein hoher Ionisationsgrad im Plasma, der direkt mit dem Wirkungsgrad von Gaslasern, z.B. von Edelgas-Ionenlasern, korreliert ist.

Gemäß dem Verhalten des Plasmas nach Figur 2 läßt sich die Erfindung in folgender Weise beschreiben:

Die so entstandene Plasmasäule befindet sich in einem Laserresonator (Figur 4a), wobei (insbesondere bei Hochleistungslasersystemen) ein direkter Kontakt des Plasmas mit dem Auskoppelfenster 7 sowie den Resonatorspiegeln 8, 9 sowie anderen (nicht dargestellten) in den Resonator eingebrachten optischen Komponenten gering gehalten werden sollte, z.B. durch Wahl eines Abstandes (Figur 4) zwischen den Fenstern 7 (bzw. Spiegeln 8, 9 und anderen optischen Komponenten, wenn diese fallsweise in das Gefäß 6 eingebracht sein sollten bzw. es abschließen sollten) und dem Plasma 11. Durch die hohe, erfindungsgemäß mit relativ geringer HF-Leistung erzielbare Elektronentemperatur ergibt sich gegenüber konventionellen Gaslasern eine energetisch wesentlich niedrigere Anschwingschwelle des Lasers.

Die beobachtete Einschnürung des Plasmas 11 unter dem Einfluß der Kombination eines magnetischen Vierpolfeldes mit einer Hochfrequenzanregung des Plasmas 11 basiert auf der Wechselwirkung der durch die Hochfrequenz ausgebildeten Teilchenströme, insbesondere ihrer zeitveränderlichen Anteile, mit dem magnetischen Gradientenfeld insbesondere in der Nähe der Achse 14, welche auch Achse des Vierpols ist. Im Vordergrund steht dabei die Kraft auf ein zur Achse 14 des magnetischen Vierpolfeldes paralleles Stromelement, insbesondere in den magnetischen Sektorfeldern im Bereich um die Vierpoldiagonalebenen (Figur 3),

welche einerseits durch die Achse 14 des Vierpolfeldes, im Zusammenhang mit den Figuren 4a und 5a auch als z-Achse bezeichnet, und andererseits durch die in Figur 4b als x-Achse 12 und y-Achse 13 bezeichneten Achsen aufgespannt werden, welche senkrecht zur z-Achse 14 verlaufen. Auf einen z.B. achsenparallelen Stromfaden wirkt hier eine zur z-Achse 14 gerichtete Kraft, deren Stärke proportional zu $\vec{j}_{HF} \times \vec{B}_{\text{Quadrupol}}$ ist, in der einen Halbwelle der Hochfrequenz und eine nach außen gerichtete Kraft in der entgegengesetzten Halbwelle der HF. Die nach außen gerichtete Kraft auf den gleichen Stromfaden ist stets geringer als die nach innen gerichtete, da im Vierpolfeld das B-Feld linear mit dem Abstand von der z-Achse 14 nach außen hin anwächst. In der einen Halbwelle der Hochfrequenz erfolgt eine Bewegung des Stromfadens nach außen und in der anderen Halbwelle der Hochfrequenz erfolgt eine größere Bewegung des Stromfadens nach innen. Auf diese Weise wird ein stromdurchflossenes Plasmagebiet in wenigen Perioden der HF zur z-Achse 14 hingetrieben.

Ein wichtiger Aspekt der Erfindung betrifft die Ladungsträgervermehrung. Experimentell zeigt sich, daß diese fast ausschließlich in einem engen Raumgebiet mit einem Diagonaldurchmesser $D_{1/2}$ von wenigen Millimetern stattfindet, insbesondere in einem Raumgebiet mit einem Diagonaldurchmesser $D_{1/2}$ von annähernd 3 mm. Da sich die zur Anregung benötigte Energie mit hohem Wirkungsgrad in das Plasma einkoppeln läßt, heißt dies, daß Energieverluste erfindungsgemäß nur in geringfügigem Maße auftreten, nämlich durch Teilchenbeschuß an der Gefäßwand in der Nähe der dem Gasgefäß 6 benachbarten Polschuhe 1, 2. Das Vierpolfeld wirkt auf das Plasma wie ein magnetischer Spiegel und komprimiert das Plasma längs der z-Achse 14, so daß nur ein geringer Anteil der Elektronen zur Gefäßwand gelangen kann. Daraus begründen sich der geringe Energieverlust und der geringe Gasverlust eines erfindungsgemäßen Lasers im Gegensatz zu konventionellen Gaslasern, bei welchen durch den Elektronenbeschuß auf

Elektroden im Gefäß und auf die Wand des Gefäßes 6 hohe Teilchenverluste und Energieverluste auftreten.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft den Durchmesser der Plasmasäule 11.

Der Krümmungsradius ρ der Elektronen mit der thermischen Geschwindigkeit v_{th}

beträgt im magnetischen Feld B: $\rho = \frac{mv_{th}}{eB}$. Unterteilt man jetzt den Raum des Feldbereiches in einen Außenraum, in welchem die oben beschriebenen nach innen treibenden Kräfte wirken, und in einen Innenraum, in dem die Elektronen um eine Feldachse, nämlich um die z-Achse 14, „pendeln“, so ist die Grenze mit einem Abstand y_0^* von der z-Achse 14 zwischen diesen beiden Gebieten durch

$y < y_0^*$ (Innenraum) und durch $y > y_0^*$ (Außenraum) gegeben, siehe Figur 3. Auf der Grenze $y = y_0^*$ ist der Krümmungsradius ρ_0^* für ein Elektron mit $v = v_{th}$ gerade

gleich dem halben Abstand von der z-Achse, auf welcher $y=0$ ist. Mit $B = B_Q \frac{y}{d}$

ist dann $B^* = B_Q \frac{y_0^*}{d}$, so daß $\rho_0^* = \frac{mv_{th}}{eB^*} = \frac{mv_{th}d}{eB_Q y_0^*}$ und mit $2\rho_0^* = y_0^*$

(siehe Anhang A1)

$$2\rho_0^* = y_0^* = \sqrt{\frac{2mv_{th}d}{eB_Q}}$$

Darin bedeutet B_Q das an den Polschuhen 1, 2 vorhandene magnetische Maximalfeld. Dieser Wert y_0^* erweist sich experimentell auch gleich dem beobachteten halben Durchmesser der Leuchtzone 11 des Plasmas (Figur 2), vergleiche die Darstellung der Plasmasäule 11 in den Figuren 4a und 4b.

Da v_{th} zu $\sqrt{kT_e}$ proportional ist, heißt dies, daß der Durchmesser des Elektronenplasmas mit der 4. Wurzel aus der Elektronentemperatur und der zweiten Wurzel aus dem Maximalfeld B_Q (am Polschuh) skaliert. Das heißt aber, daß die mit der Erfindung einhergehende Konzentration des heißen Elektronenplasmas auf engstem Raum selbst bei extrem hohen Elektronentemperaturen nur mit der 4. Wurzel

aus T_{el} „aufgeweicht“ wird; die durch das magnetische Vierpolfeld eingeschnürte Säule 11 des Elektronenplasmas erweitert sich nur mit der 4. Wurzel aus der Elektronentemperatur T_{el} . Andererseits fällt dieser Durchmesser der Säule 11 des Elektronenplasmas mit der Quadratwurzel des Magnetfeldes B_Q , so daß sich für Glaslaser, insbesondere für Ar-Ionen-Laser mit supraleitenden Quadrupolanordnungen zur Erzeugung starker Magnetfelder mit einer magnetischen Induktion B_Q von z.B. bis zu 8 oder 10 Tesla grundsätzlich neue innovative Konzepte für Anwendungen bei hohen Leistungsdichten erwarten lassen. Im vorliegenden Fall wurde mit einer 40 W HF-Entladung von 40 MHz in einem Argonionenlaser bereits eine Elektronentemperatur in der Plasmasäule 11 von ungefähr 0,3 eV erreicht, was $T_{el} \approx 3000$ K entspricht. Nach der SAHA-Gleichung erreicht man für $kT_{el} \approx 1$ eV einen Ionisationsgrad von etwa 10%. Man erkennt daraus, daß der Wirkungsgrad eines erfindungsgemäßen Lasers viel größer als der eines konventionellen Ar-Lasers ist. Da keine wesentliche Barriere für die maximale Elektronentemperatur vorliegt, lassen sich hochionisierte Plasmen erzeugen, mit welchen im geeigneten Druckbereich eines im CW-Verfahren betriebenen Ar-Lasers bis zu mehreren 100W Laserleistung erreichbar sein dürften! Zum anderen eröffnet die Erfindung eine neue Möglichkeit für eine gepulste HF-Einstrahlung, bei welcher Laserpulse mit Zeitdauern von 10^{-8} s bis 10^{-6} s bei hoher Pulsfrequenz mit Laserleistungen bis zu 500 kW im Pulsbereich zu erwarten sind. Hiermit lassen sich Ar-Laser herstellen, die sich mit den bekannten Methoden der nichtlinearen Optik frequenzverdoppeln oder frequenzvervielfachen lassen, so daß sowohl im Leistungsbereich der Laser als auch im Anwendungsbereich von UV-Lasern und von Röntgenlasern grundsätzlich neue und vorteilhafte Laser und Anwendungen für sie geschaffen werden können.

Zur Realisierung der Erfindung ist ein geeigneter Druckbereich im Gasgefäß festzulegen. Der Fülldruck ist aus der Sicht der Plasmasäule optimal, wenn die freie Weglänge für den elastischen Stoß zwischen einem Elektron und einem

Neutralatom oder einem Molekül für thermische Elektronen etwa gleich dem mittleren 2π -fachen Gyrationradius im magnetischen Feldbereich des Plasmaran-

des ist. Das ist für Argon für $B_0 \approx 1\text{T}$ und $\frac{mv_{th}^2}{2} \approx 1\text{eV}$ der Fall für Gasfülldrücke von etwas unterhalb 0,5 mbar.

Zur Realisierung der Erfindung ist die HF-Energie in das vom laseraktiven Volumen ausgefüllte Raumgebiet 11 im Bereich um die Vierpolachse 14 einzukoppeln. Hierzu geben die Figuren 5a, b Aufschluß. Die Frequenz ν_{HF} des HF Kreises

(Figuren 5a, b) ist gegeben durch die Beziehung $2\pi\nu_{HF} = \frac{1}{\sqrt{L_{ges}C_{ges}}}$ wobei L_{ges} und C_{ges} die insgesamt im Schwingkreis wirkende Induktivität und Kapazität beschreiben. Hieraus folgt mit $R_{blind} = \sqrt{\frac{L_{015}}{C_{015}}}$ der Blindwiderstand des Schwingkreises, der für alle relevante Plasmen größer ist als der sich in der gezündeten Plasmazone stationär aufbauende Widerstand R_{plasma} . Den Quotient $G = R_{blind}/R_{plasma}$ nennt man die Güte des Schwingkreises. Die Einkopplung der Energie aus dem HF-Feld kann

longitudinal über Elektroden 16, 17 wie in Figur 5b und Figur 5d dargestellt, oder

azimutal z.B. über eine innerhalb des Gasvolumens oder außerhalb desselben befindliche Spule 4 gemäß den Figuren 5a und 5c erfolgen. Auch eine Kombination von longitudinaler und azimutaler Einkopplung des HF-Feldes ist möglich, siehe Figur 5e.

Im Falle einer longitudinalen Einkopplung wirken auf die geladenen Teilchen unter dem Einfluß der Lorentzkraft nach innen treibende Kräfte, welche eine starke Fokussierung bewirken; das durch die Hochfrequenz angefachte laseraktive Plasma wird im Achsenbereich komprimiert. Der zu beobachtete Durchmesser der leuchtenden Plasmasäule beträgt nur wenige Millimeter, z.B. 6 bis 8 mm. Die im Falle der Einkopplung nach Figur 5b im Resonanzfall

$$\nu_{HF} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(L_H + L_A) \cdot C}}$$

anliegende HF-Spannung beträgt dann

$$I_{HF} \cdot R_{imp} \cdot \frac{L_2}{L_{pl} + L_1} \quad \text{mit } R_{imp} = R_{BUND} \cdot G$$

Mit dieser Schaltanordnung wird wegen des relativ hohen Wertes der Impedanz R_{imp} eine besonders wirksame Energieeinkopplung erreicht.

Man kann den Schwingkreis auch mit $L_1 = 0$, das heißt, nur mit der Eigeninduktivität L_{pl} des Plasmas betreiben. Dies gilt insbesondere für gepulste Laser gemäß Figur 5d.

Im Falle azimuthaler Einkopplung verschwindet die Lorentzkraft auf die induzierten Plasmaströme, weil j_{HF} weitgehend parallel zum Magnetfeld des Quadrupols weist. Der magnetische Feldgradient erzeugt jedoch eine ambipolare Teilchendrift in Richtung gegen die Vierpolachse, welche hier i.w. mit der Achse 14 des Gefäßes 6 zusammenfällt. Die Elektronen führen nämlich in Richtung der Achse 14 eine z. B. wendelförmige Driftbewegung aus, wobei entlang der Teilchenbahnen die Aufenthaltswahrscheinlichkeit in der Nähe der Achse 14 am größten ist. Durch Stöße löst dies eine zur Achse 14 hin gerichtete Diffusion aus. Das Ergebnis ist in Figur 2 zu sehen.

Im Bereich hoher Frequenzen wird das laserfähige Volumen durch den Skineffekt eingeschränkt was (keineswegs immer unerwünschte) Einschränkungen zur Gestaltung des Laserstrahlprofils zur Folge hat. Die Einkopplung der HF-Energie erfolgt bei sehr hohen Frequenzen zweckmäßig über geeignet dimensionierte Kavitäten. Das gilt auch für den Mikrowellenbereich. An der unteren Frequenzgrenze kann der Frequenzgenerator durch einen dann kostengünstigeren Wechselstromgenerator ersetzt werden. Die azimuthale Einkopplung erfolgt bei den niedrigsten möglichen Frequenzen bis hinunter z.B. zum konventionellen Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz. Der ökonomischste Frequenzbereich liegt im Bereich um 100 kHz für welchen Frequenzgeneratoren auf Halbleiterbasis zu Verfügung stehen.

Für den CW-Betrieb sind außer Argon-Ionen-Lasern des einfach geladenen Ions auch mehrfach geladene Edelgas-Ionen-Laser z.B. Ar^{2+} als auch Ne^{1+} und Ne^{2+} von besonderem Interesse, deren Energieniveaus wegen des hohen Wirkungsgrades erfindungsgemäßer Laser bei Elektronentemperaturen von 1 eV - 5 eV auch im CW-Betrieb mit Multi-kW-Generatoren erreicht werden können. Solche Laser reichen in den ultravioletten Frequenzbereich hinein.

Gepulste Energiezufuhr läßt sich erreichen durch HF-Pulse geeigneter Länge bei ausreichend hohen Frequenzen, wobei die HF-Pulse im Bedarfsfall einer Dauerstrich-HF überlagert werden können (siehe Anspruch 29). Dadurch kann der Laser kontinuierlich knapp unterhalb seiner Zündschwelle gehalten werden, welche durch die HF-Pulse dann jeweils überschritten wird. Insbesondere im Falle von gepulsten Ar^{1+} Hochleistungslasern ist eine am Strahl mit konventionellen Methoden erreichbare Frequenzverdopplung bzw. -vervielfachung möglich.

Extreme Verhältnisse sind durch extreme Pulsamplituden z.B. in HF-Cavities erreichbar für VUV-Systeme auf der Basis hochgeladener im Gas erzeugter Ionen (z.B. Ar^{7+} , Ar^{8+}), hierfür gibt es interessante Anwendungen in der Medizin (insbesondere für Operationen im Auge), Lithographie und Röntgenmikroskopie, wo es auf extrem kurzwelliges Laserlicht ankommt, um damit feinste Strukturen erzeugen und / oder bearbeiten zu können.

Wegen der Abhängigkeit des aktiven Laservolumens von B_Q sind hierzu auch supraleitende Quadrupolanordnungen von Vorteil.

AnhangTheoretische Modelle zur Beschreibung von Phänomenen im Zusammenhang mit der ErfindungAnhang A1: Teilchenbahnen

Zur Beschreibung der Teilchenbahnen der Elektronen wollen wir xyz Koordinaten ($x=y=0$ auf Achse, z in Achsenrichtung, $\{x=0\}$ → eine der zwei Diagonalebenen, $\{y=0\}$ → die andere Diagonalebene) verwenden. Es sollen jetzt die Projektionen von Elektronenbahnen auf die Ebene $\{x=0\}$ für eine stoßfreie Bewegung von Teilchen mit der Geschwindigkeit $v=v_{th}$ ermittelt werden. Führen wir jetzt zusätzlich für ein betrachtetes Teilchen die Bahnkoordinaten ρ, φ , ein mit ρ =Krümmungsradius der Bahn, φ =Winkel zwischen der z -Richtung und der Senkrechten auf die Projektion der Teilchenbahn, so läßt sich (für einen Sektor) die Projektion jeder individuellen Bahn auf die Ebene $\{x=0\}$ beschreiben, wenn man noch y_0 als y -Koordinate des Krümmungsmittelpunktes der Bahn-Projektion an der Stelle $\varphi=0$ des Teilchens einführt. Es gilt dann für das Magnetfeld am Teilchenort y :

$$B(y) - B(y_0) = (y - y_0) \left(\frac{dB}{dy} \right)$$

mit $\left(\frac{dB}{dy} \right)_{y=y_0} = \nabla B_0 = \frac{B_0}{d}$ (Eigenschaft des Vierpolfeldes in den Diagonalebenen)

und $B(y_0) = \frac{B_0}{d} y_0$

Da andererseits an jeder Stelle in diesen Ebenen $\rho = \frac{mv_{th}}{eB}$ (m =Elektronenmasse, e =Elementarladung) ist, gilt mit $ds = \sqrt{dy^2 + dz^2} = \rho d\varphi =$ Linienelement der Teil-

chenbahn-Projektionen, $\tan \varphi = \frac{dz}{dy}$ und

$$\frac{dy}{\rho} = \frac{e}{mv_{th}} \{ B(y_0) + (y - y_0) \nabla B_0 \} dy = d\varphi \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi}}$$

Damit ergibt sich nach Integration (mit $\rho_0 = \frac{mv_{th}}{eB(y_0)}$) und $B(y_0)=B_0$

$$\frac{1}{\rho_0} \int_{y_0}^y \left\{ 1 + (y - y_0) \frac{\nabla B_0}{B_0} \right\} dy = \int_0^\varphi \cos \varphi d\varphi$$

so daß:

$$(y - y_0)^2 + (y - y_0) 2 \frac{B_0}{\nabla B_0} - 2 \rho_0 \frac{B_0}{\nabla B_0} \sin \varphi = 0$$

und damit als Lösung:

$$y - y_0 = \frac{B_0}{\nabla B_0} \left\{ \left(1 + 2 \rho_0 \frac{\nabla B_0}{B_0} \sin \varphi \right)^{1/2} - 1 \right\}$$

Daraus folgen die Bahndifferentiale:

$$dy = \frac{\rho_0 \cos \varphi d\varphi}{\sqrt{1 + 2 \frac{\nabla B_0}{B_0} \rho_0 \sin \varphi}}$$

(Gl.1)

$$dz = \frac{\rho_0 \sin \varphi d\varphi}{\sqrt{1 + 2 \frac{\nabla B_0}{B_0} \rho_0 \sin \varphi}}$$

(Gl.2)

Mit den tabellierten elliptischen Integralen ergeben sich Bahnprojektionen auf die

y, z-Ebene im Zentralbereich des Feldes. Der entartete Fall $2 \rho_0 \frac{\nabla B_0}{B_0} = 1$ mit $\frac{\nabla B_0}{B_0} = \frac{1}{y_0^*}$ kennzeichnet den charakteristischen Radius $\frac{1}{2} D_{1/2}$ der Plasmasäule im magnetischen Vierpolfeld. Er beschreibt die asymptotische Annäherung der Teilchenbahnprojektionen an die Vierpolachse (bei $\varphi = \frac{3\pi}{2}$).

Figur 3 zeigt nach Gl.1, 2 berechnete Teilchenbahnen im Vierpolzentralbereich. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch Bahnen, die um die Vierpolachse pendeln, genauer:

Alle Elektronenbahnprojektionen mit der mittleren Geschwindigkeit v_{th} bleiben innerhalb der y-Koordinaten $y_0^* \cdot \sqrt{2}$ mit dem Durchmesser dieser Zone von:

$$D_{1/2} = 2\sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{2mv_{th}d}{eB_Q}} = 2\sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt[4]{8mkT_{el}}}{\sqrt{\frac{eB_Q}{d}}}$$

(Gl.3)

$D_{1/2}$ stimmt in guter Näherung mit dem gemessenen Diagonaldurchmesser der Leuchtzone überein.

Anhang A2: Ionisation und Anregung:

Die Untersuchung wird am Beispiel des Ar-Ionenlasers durchgeführt. Es soll nur das Plasma innerhalb der Plasmasäule (Figur 2) betrachtet werden. Ionisation und Anregung findet im wesentlichen durch Elektronenstoß unter dem Einfluß der durch die Hochfrequenzfelder angefachten longitudinalen (parallel zur z-Achse) und azimuthalen elektrischen Feldkomponenten statt. Es gilt dabei das (verallgemeinerte) Ohm'sche Gesetz der Plasmaphysik: $\vec{j} = \sigma \vec{E}_{HF}$. Für den Term j_z (longitudinale Komponente) gilt nach der Drude-Lorentz-Theorie für diesen Anteil des

Gesamtstromes $\sigma_{DR} = \frac{n_i e^2}{m} \cdot \tau_{en}$ mit $\tau_{en} = \text{Stoßzeit}$ für Elektron-Atom-Stöße (mit neutralen Ar-Atomen). Die Stoßzeit beträgt $\tau_{en} = \frac{\lambda_{en}}{v_{th}}$ mit $\lambda_{en} = \frac{1}{n_0 q_{ei}}$, wobei λ_{en} die freie Weglänge für den Elektron-Neutralatomstoß und q_{ei} der Stoßquerschnitt für diesen Elektronenstoß ist. Damit ergibt sich in guter Näherung der Ionisations-

grad und die Leitfähigkeit: $\sigma_{DR} = \frac{n_i}{n_0} \cdot \frac{e^2}{\sqrt{2mkT_{ei}}} \cdot \frac{1}{q_{ei}}$ mit $\frac{n_i}{n_0} = \alpha = \text{Ionisationsgrad}$ unter Anwendung der Saha-Gleichung:

$\alpha = \frac{n_i}{n_0} = 4,91 \cdot 10^{10} \cdot \frac{T_{ei}^{3/2}}{n_0^{1/2}} \cdot e^{-\frac{w_i}{2kT_{ei}}}$ worin w_i die Ionisationsenergie von Ar (≈ 16 eV), n_0 in m^{-3} und $q_{ei} \approx 10^{-19} m^2$ ist.

Mit steigender Elektronentemperatur steigt der Ionisationsgrad und die Wechselwirkungen Elektron-Elektron und Elektron-Ion treten in den Vordergrund. Dies führt zur Spitzer'schen Leitfähigkeitsformel, die auf der Kleinwinkelstreuung als Folge der langreichweitigen Coulombkräfte beruht. Es ist dazu in der Drude-Gleichung τ_{en} durch $\tau_{ee} + \tau_{ei}$ zu ersetzen, wobei $\tau_c = \tau_{ei} + \tau_{ee}$ die Stoßzeit für oben genannte „>90°-Stöße“ mit $\tau_c \sim \frac{1}{n_i}$ einzusetzen ist.

Damit gilt nach Spitzer für „vollionisierte Plasmen“: $\sigma_{Sp} \approx 4 \cdot 10^{-3} \cdot T_{ei}^{3/2}$ (T_{ei} in Kelvin)

Die Bedingung $\sigma_{DR} = \sigma_{Sp}$ kennzeichnet den Überlappungsbereich der beiden Darstellungen von σ als Funktion von T_{ei} . Er beginnt bei Argon bei etwa 9000 K.

Unterhalb dieser Temperatur ergibt sich eine sehr steile Temperaturabhängigkeit von σ_{DR} aufgrund des steilen Anstiegs von α zwischen 5000 K und 9000 K. Oberhalb von 9000 K ergibt sich ein relativ langsames Anwachsen der Leitfähigkeit mit $T_{el}^{\frac{3}{2}}$. Oberhalb $kT_{el} \approx 10\text{eV}$ ergeben sich hohe Ionisierungsgrade (erkennbar durch Anwendung der Saha-Gleichung auf mehrfach ionisierte Gase) und damit neue Perspektiven für VUV-Lasersysteme insbesondere bei gepulster HF-Energiezufuhr. Unterhalb etwa 5000 K ist der Ionisationsgrad und damit die Leitfähigkeit sehr gering. In diesem Fall ist die durch die in dieser Betrachtung nicht berücksichtigten „runaway“-Elektronen erfolgende Ionisierung von Bedeutung. Die Ionisation und damit auch die Anregung in die laserfähigen Niveaus ist dann proportional zu $j_{runaway}^2$ wobei $j_{runaway}$ die Stromdichte des Stroms der schnellen runaway-Elektronen darstellt. In diesem Niedertemperaturfall verhält sich das Lasersystem sehr ähnlich wie die konventionellen Ar-Ionen-Laser, jedoch ist auch hier ein höherer Wirkungsgrad wegen der besseren Ökonomie der Ladungsträgererzeugung zu verzeichnen.

Anhang A3: Die Kompression des Plasmas

Die Kompression des Plasmas beruht auf dem Wechselspiel zwischen der starken Fokussierung im Gradientenfeld und der bevorzugten Ladungsträgervermehrung im Gebiet $2y < D_H$, wobei bei hohen Strömen ein Dichteanstieg aufgrund der magnetohydrodynamischen Kräfte ($n_i T_{el} \sim I_{HF}^2$) zu verzeichnen ist. Den Magnetfeldern des statischen Quadrupols kommt dabei die wichtige Rolle der räumlichen Stabilisierung der Plasmasäule zu. Hieraus entsteht ein Vorteil hinsichtlich der optischen Qualität der emittierten Laserstrahlung. Die Ausführungen des Anhang A1 demonstrieren das „Festhängen“ der Elektronenbahnen im Gefüge der magnetischen Feldlinien des Quadrupolfeldes, wobei der Bewegungsraum der Elektronen sowie deren Vermehrung auf den Raum der Plasmasäule begrenzt sind. Die Ionen andererseits, deren $B \cdot p$ Werte im Zentralbereich wesentlich größer sind, werden durch elektrostatische Kräfte vom Ensemble der Elektronen eingefangen, so daß letztlich ein geringfügig (nämlich in etwa die doppelte Debye-Länge) vergrößerter Diagonaldurchmesser für das Ionenensemble entsteht. Im Grenzbereich entsteht dabei ein Potentialgefälle mit dem Potentialunterschied zwischen Elektronen und Ionen von $\Delta U = \frac{kT_{el}}{e}$.

Bezugszahlenliste:

- | | |
|----|-----------------------|
| 1 | Magnetpol |
| 2 | Magnetpol |
| 3 | Wicklungen |
| 4 | Spule |
| 5 | Stromquelle |
| 6 | Gefäß |
| 7 | Auskopplungsfenster |
| 8 | Hohlspiegel |
| 9 | Spiegel |
| 10 | Laserstrahl |
| 11 | Plasmasäule |
| 12 | x-Achse |
| 13 | y-Achse |
| 14 | z-Achse |
| 15 | Hochfrequenzgenerator |
| 16 | Elektroden |
| 17 | Elektroden |
| 18 | Kondensator |
| 19 | Spule |
| 20 | Spule |
| 21 | Ladekondensator |
| 22 | Schalter |
| 23 | Ladegerät |
| 24 | Elektroden |
| 25 | Elektroden |
| 26 | Bereich |
| 27 | Pfeile |
| 28 | Gebläse |
| 29 | Wärmetauscher |
| 30 | Entnahmeleitung |
| 31 | Absperrventil |
| 32 | Zuleitung |
| 33 | Absperrventil |
| 34 | Plasmastrecke |

Patentansprüche:

1. Gaslaser mit einem Gefäß (6) zum Aufnehmen eines Gases oder eines Gasgemisches als laseraktives Medium, wobei das Gefäß (6) eine Achse (14) hat, in dessen Richtung der Gaslaser seine Laserstrahlung emittiert, mit Mitteln zum Erzeugen eines Plasmas in dem Gefäß (6) und mit Mitteln zum Erzeugen eines magnetischen Feldes in dem Gefäß (6), **dadurch gekennzeichnet**, daß eine Gruppe aus wenigstens zwei Magnetpolpaaren vorgesehen ist, deren Pole (1, 2) sich mit Abstand von der Achse (14) längs der Achse (14) erstrecken und mit alternierender Polarität derart um die Achse (14) herum angeordnet sind, daß das von ihnen ausgehende Magnetfeld im Bereich der Achse (14) eine Senke hat, und daß die Mittel zum Erzeugen des Plasmas eine Quelle für ein elektromagnetisches Wechselfeld beinhalten, welche dem Gefäß (6) zugeordnet ist.
2. Gaslaser nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Magnetfeld im Bereich der Achse (14) verschwindet.
3. Gaslaser nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Achse (14) eine Symmetrieachse der Anordnung aus den Magnetpolpaaren ist.
4. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Achse (14) eine Symmetrieachse des Gefäßes (6) ist.
5. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gefäß (6) eine Röhre, insbesondere mit kreisförmigem Querschnitt, ist.

6. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß in jeder beliebigen Querschnittsebene des Gefäßes (6) nicht mehr als vier Magnetpolpaare um die Achse (14) herum angeordnet sind.
7. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß mehrere Gruppen von Magnetpolpaaren in Richtung der Achse (14) hintereinander angeordnet sind.
8. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Anordnung von Polen (1, 2), welche ein Magnetfeld mit einer Stärke von bis zu 10 Tesla erzeugen kann.
9. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** eine Anordnung von Polen (1, 2), welche ein Magnetfeld mit einer Stärke zwischen 0,1 und 2 Tesla, vorzugsweise zwischen 0,1 und 1 Tesla erzeugen kann.
10. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Magnetpole (1, 2) an Magneten ausgebildet sind, welche außerhalb des Gefäßes (6) angeordnet sind.
11. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Pole (1, 2) an Permanentmagneten ausgebildet sind.
12. Gaslaser nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Pole (1, 2) von einem oder mehreren Elektromagneten gebildet sind.

13. Gaslaser nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß der bzw. die Elektromagnete von einer Gleichstromquelle (5) erregt werden.
14. Gaslaser nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß der bzw. die Elektromagnete von einer Wechselstromquelle (5) erregt werden, insbesondere mit Wechselstrom von 50 Hz oder 60 Hz.
15. Gaslaser nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Frequenz der Wechselstromquelle (5), welche den bzw. die Elektromagneten erregt, klein gegen die Frequenz des elektromagnetischen Wechselfeldes ist, welches das Plasma erzeugt.
16. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gas bzw. das Gasgemisch in dem Gefäß (6) einen solchen Druck aufweist, daß die mittlere freie Weglänge für den elastischen Stoß thermischer Elektronen gegen neutrale Atome oder Moleküle des Gases ungefähr gleich dem mittleren 2π - fachen des Gyationsradius der freien Elektronen im Magnetfeld am Rande des Plasmas ist.
17. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Quelle des elektromagnetischen Wechselfeldes eine Spule (4) ist, die das Gefäß (6) umgibt und Bestandteil eines elektrischen Schwingkreises ist, welcher von einem Frequenzgenerator (15) gespeist wird.
18. Gaslaser nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Spule (4) das Gefäß (6) nur auf einem Teil seiner Länge umgibt, welcher von den Enden des Gefäßes (6) Abstand hat.

19. Gaslaser nach Anspruch 18, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Windungen der Spule (4) den Achsenbereich des von den Polen (1, 2) ausgehenden Multipolfeldes umschließen, insbesondere den Achsenbereich (Achse 14) eines von zwei Magnetpolpaaren ausgehenden Vierpolfeldes.
20. Gaslaser nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, daß zwei oder mehr als zwei Elektroden (16, 17) in dem Gefäß (6) die Quelle des elektromagnetischen Wechselfeldes und Bestandteile eines elektrischen Schwingkreises sind, welcher von einem Frequenzgenerator (15) gespeist wird.
21. Gaslaser nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Elektroden (16, 17) im Achsenbereich des von den Polen (1, 2) ausgehenden Multipolfeldes, insbesondere im Achsenbereich (Achse 14) eines von zwei Magnetpolpaaren (1, 2) ausgehenden Vierpolfeldes, jeweils ein Loch, eine Ausnehmung, eine Perforation oder dergleichen Durchgang zum Durchtritt der Laserstrahlung haben.
22. Gaslaser nach Anspruch 20 oder 21, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Schwingkreis eine Spule (19) enthält, welche in Reihe mit der durch die Elektroden (16, 17) bestimmten Plasmastrecke (34) geschaltet ist und diese umgibt, wobei ein Kondensator (18) des Schwingkreises parallel zu der aus der Spule (19) und der Plasmastrecke (34) zwischen den Elektroden (16, 17) gebildeten Anordnung liegt.
23. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß das elektromagnetische Wechselfeld ein Niederfrequenzfeld ist.

24. Gaslaser nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet**, daß das elektromagnetische Wechselfeld eine Frequenz von wenigstens 50 Hz hat.
25. Gaslaser nach einem der Ansprüche 1 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, daß das elektromagnetische Wechselfeld ein Hochfrequenzfeld ist.
26. Gaslaser nach einem der Ansprüche 1 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, daß das elektromagnetische Wechselfeld ein Mikrowellenfeld ist.
27. Gaslaser nach einem der Ansprüche 1 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Quelle des elektromagnetischen Wechselfeldes eine frequenzangepaßte und dadurch resonanzfähige Kavität ist, die den Raumbereich des laseraktiven Plasmas umschließt und Bestandteil eines Hochfrequenzgenerators oder eines Mikrowellengenerators ist.
28. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß er ein kontinuierlich betriebener Laser (CW - Laser) ist.
29. Gaslaser nach einem der Ansprüche 1 bis 27, **dadurch gekennzeichnet**, daß er ein gepulst betriebener Laser ist.
30. Gaslaser nach Anspruch 29, **dadurch gekennzeichnet**, daß Mittel zum permanenten Erzeugen einer Gasentladung in Kombination mit Mitteln (20 - 23) für eine gepulste Energiezufuhr an das Plasma vorgesehen sind, so daß einer permanenten Gasentladung, insbesondere einer HF- oder Mikrowellengasentladung, eine gepulste Energiezufuhr an das Plasma überlagert werden kann.

31. Gaslaser nach Anspruch 29 oder 30, **dadurch gekennzeichnet**, daß für den gepulsten Betrieb des Lasers die Länge der Plasmasäule im Gefäß (6) begrenzende Elektroden (24, 25) vorgesehen sind, die sich in einem Schaltkreis befinden, in welchem ein aufladbarer Kondensator (21) über einen schnellen elektronischen Schalter (22) und über die Elektroden (24, 25) entladen werden kann.
32. Gaslaser nach Anspruch 29 oder 30, **dadurch gekennzeichnet**, daß für den gepulsten Betrieb des Lasers eine das Plasma weitgehend einschließende Spule (20) vorgesehen ist, die sich in einem Schaltkreis befindet, in welchem ein aufladbarer Kondensator (21) über einen schnellen elektronischen Schalter (22) und über die Spule (20) entladen werden kann.
33. Gaslaser nach Anspruch 31 oder 32, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Schalter (22) ein Thyatron, ein Thyristor oder ein Pseudofunkenschalter ist.
34. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gas bzw. das Gasmisch im Gefäß (6) mindestens ein Edelgas aus der Helium, Neon, Argon, Xenon und Krypton umfassenden Gruppe enthält.
35. Gaslaser nach Anspruch 34, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Mittel zum Erzeugen des Plasmas und die Mittel zum Erzeugen eines magnetischen Feldes so ausgebildet sind, daß Laserübergänge in einfach oder mehrfach geladenen Ionen der Edelgasfüllung angeregt und die daraus sich ergebende Laserstrahlung über ein Auskoppelfenster (7) emittiert wird.

36. Gaslaser nach einem der Ansprüche 1 bis 33, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gefäß (6) im wesentlichen Kohlendioxid enthält.
-
37. Gaslaser nach Anspruch 36, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gefäß (6) zusätzlich Stickstoff und Helium oder Stickstoff und Neon enthält.
38. Gaslaser nach einem der vorangehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Frequenzverdoppelung oder Frequenzvervielfachung der emittierten Laserstrahlung eine Einrichtung vorgesehen ist, welche nach der Methode der nichtlinearen Optik arbeitet und insbesondere einen nicht-linear optischen Kristall enthält.
39. Verwendung eines Gaslasers nach Anspruch 38 als Röntgenlaser.
40. Verwendung eines Gaslasers nach einem der Ansprüche 1 bis 38 für medizinische Operationen, insbesondere für Augenoperationen und für Hautbehandlungen.
41. Verfahren zum Betreiben eines CO₂-Lasers nach Anspruch 36 oder 37 mit einem vom Gas durchflossenen Gefäß (6), **dadurch gekennzeichnet**, daß die Energieeinstrahlung durch das elektromagnetische Wechselfeld und der Gasdruck so aufeinander abgestimmt werden, daß die mittlere Elektronentemperatur T_e nicht größer als 0,5eV/k, vorzugsweise 0,3eV/k ist, wobei k die Boltzmannkonstante ist.
42. Verfahren nach Anspruch 41, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gas gekühlt wird.

43. Verfahren nach Anspruch 41 oder 42, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gas im Kreislauf umgewälzt wird.
-
44. Verfahren nach Anspruch 42 und 43, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Gas zur Kühlung über einen Wärmetauscher (29) geführt wird.
45. Verfahren nach Anspruch 41, 42, 43 oder 44, **dadurch gekennzeichnet**, daß Dissoziationsprodukte des CO₂ aus dem Gasfluß entfernt und durch CO₂ ersetzt werden und daß zu diesem Zweck im Gefäß (6) eine quer zur Achse (14) verlaufende Gasströmung erzeugt wird.

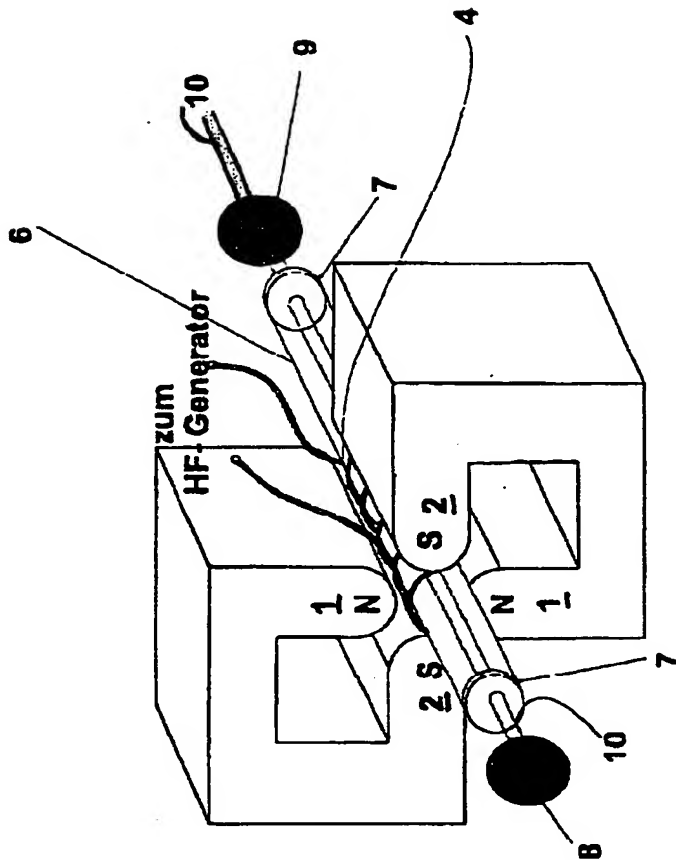


Fig. 1

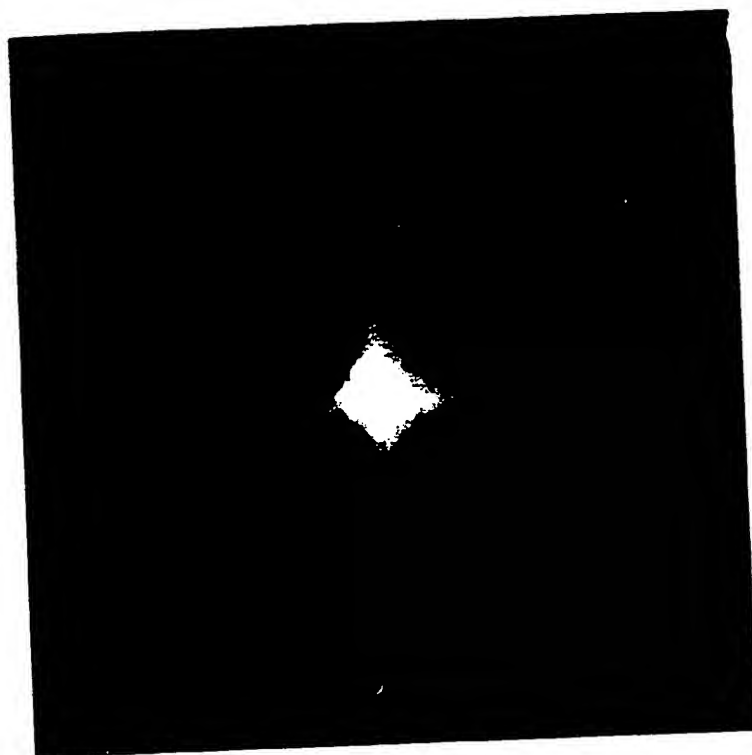


Fig.2 Scan-Bild des laseraktiven Plasmas
Diagonaldurchmesser 2,8mm
Polschuhabstand 3cm
Neon, 40MHz, 40W

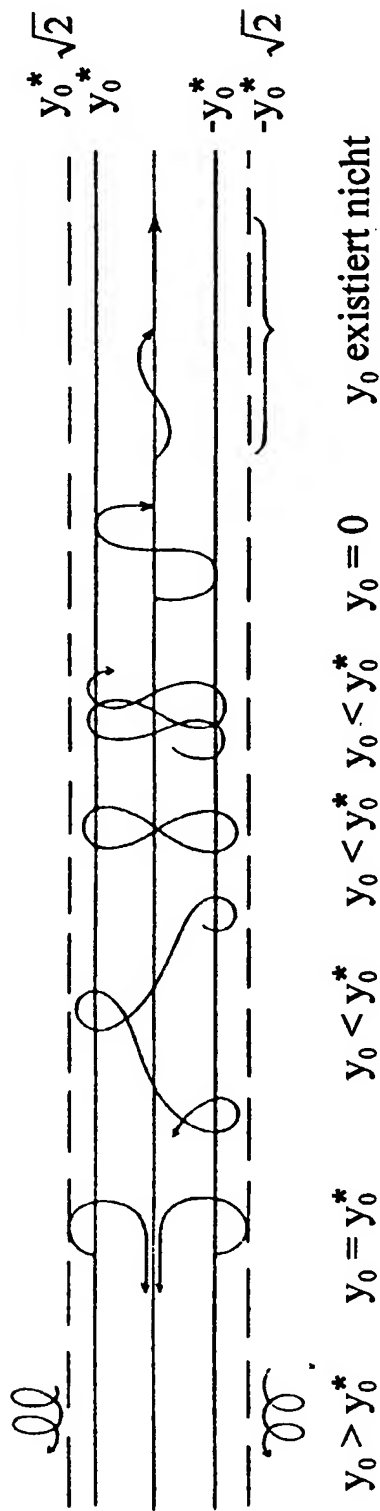


Fig.3

Elektronenbahnen nach Anhang A1

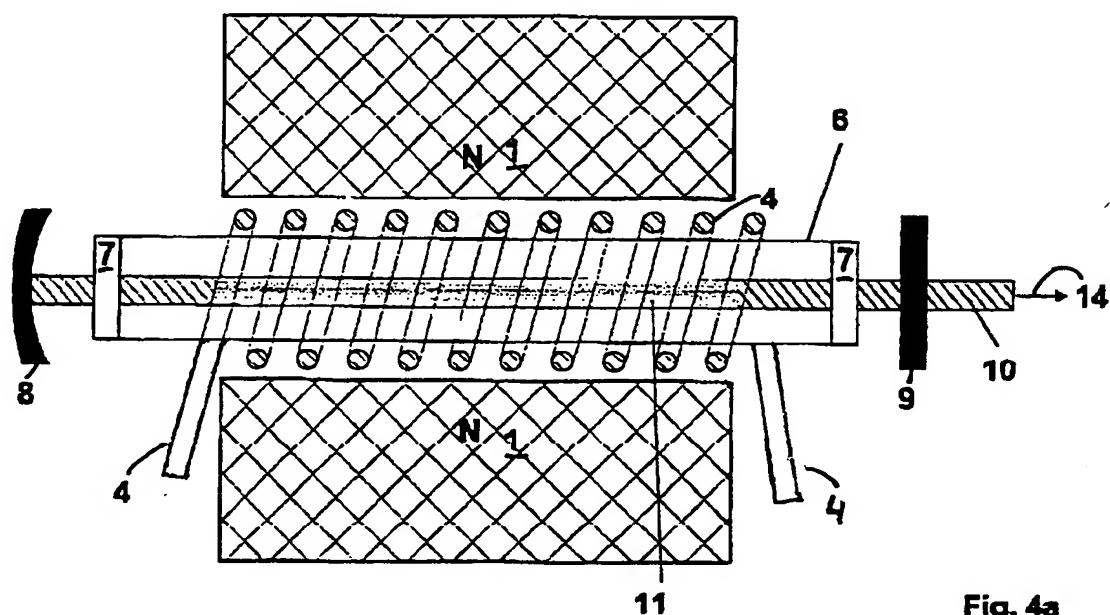


Fig. 4a

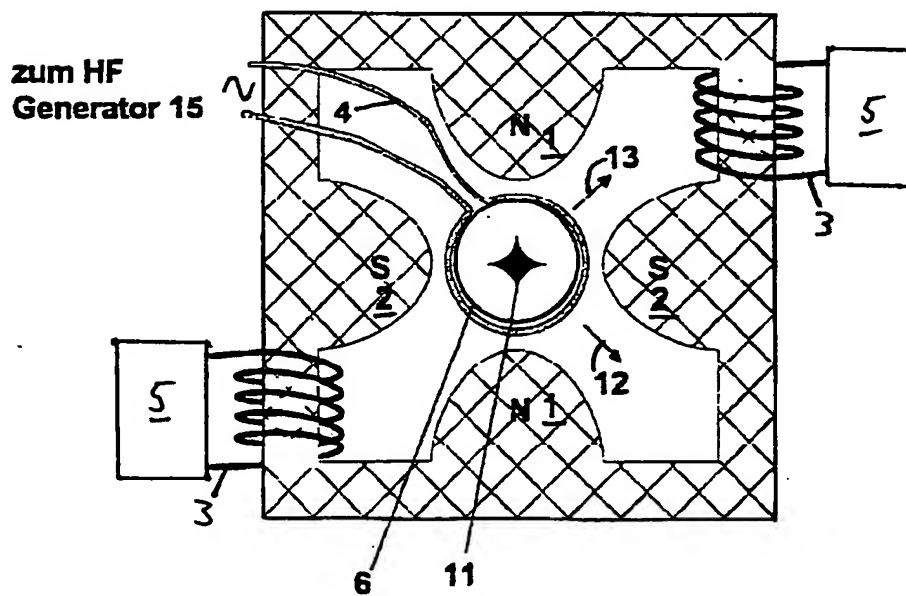


Fig. 4b

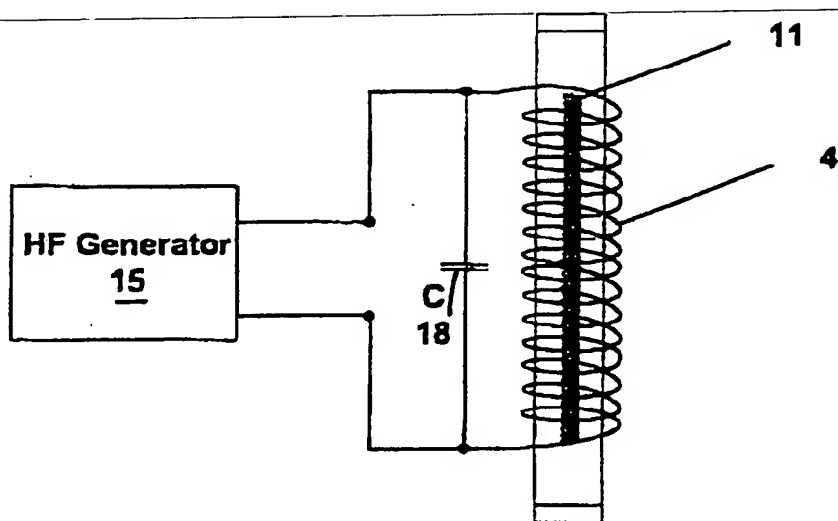


Fig. 5a

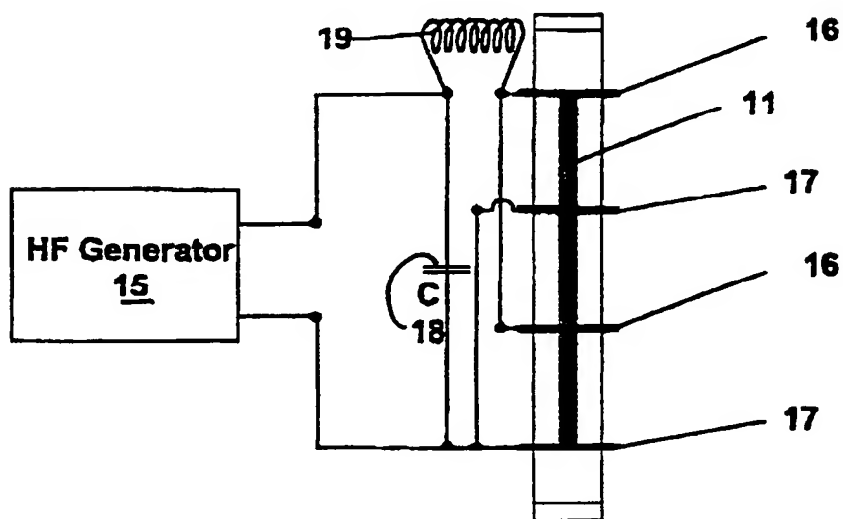


Fig. 5b

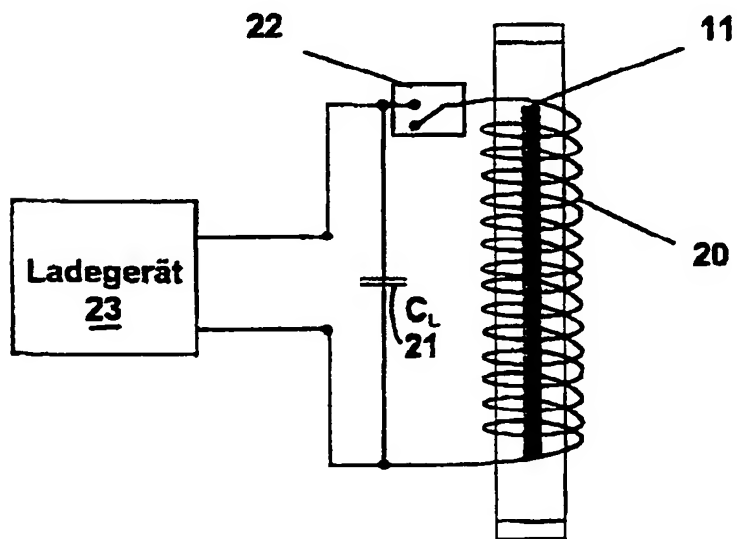


Fig. 5c

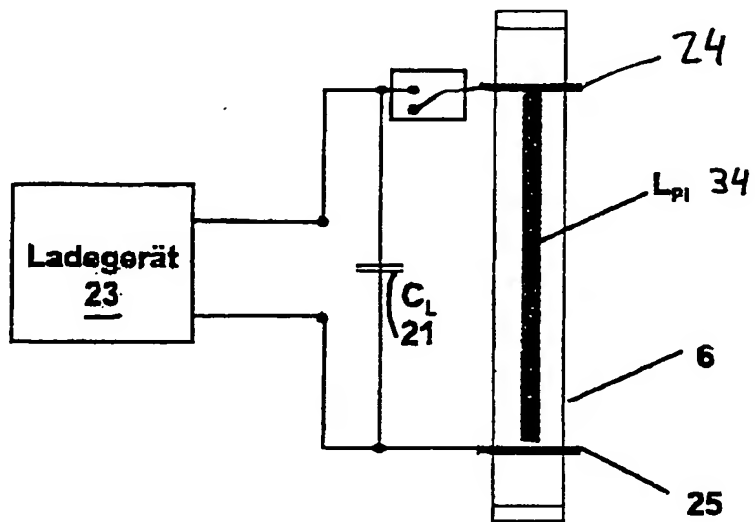


Fig. 5d

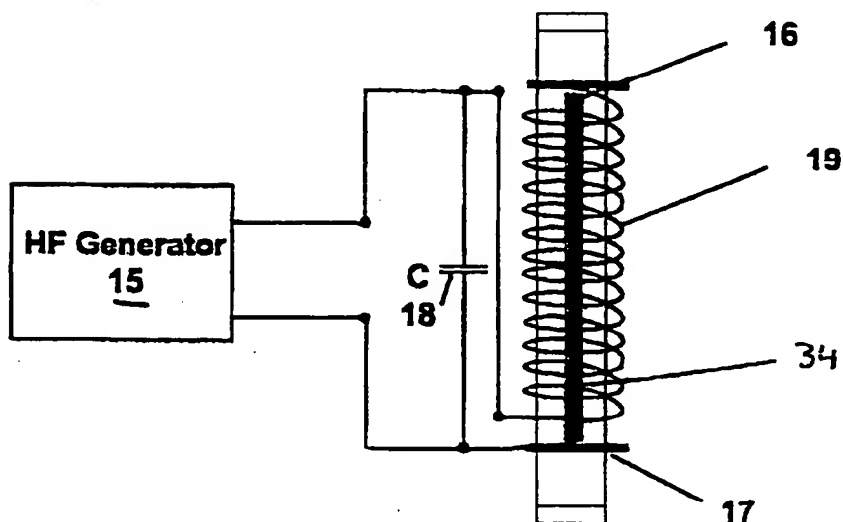


Fig. 5e

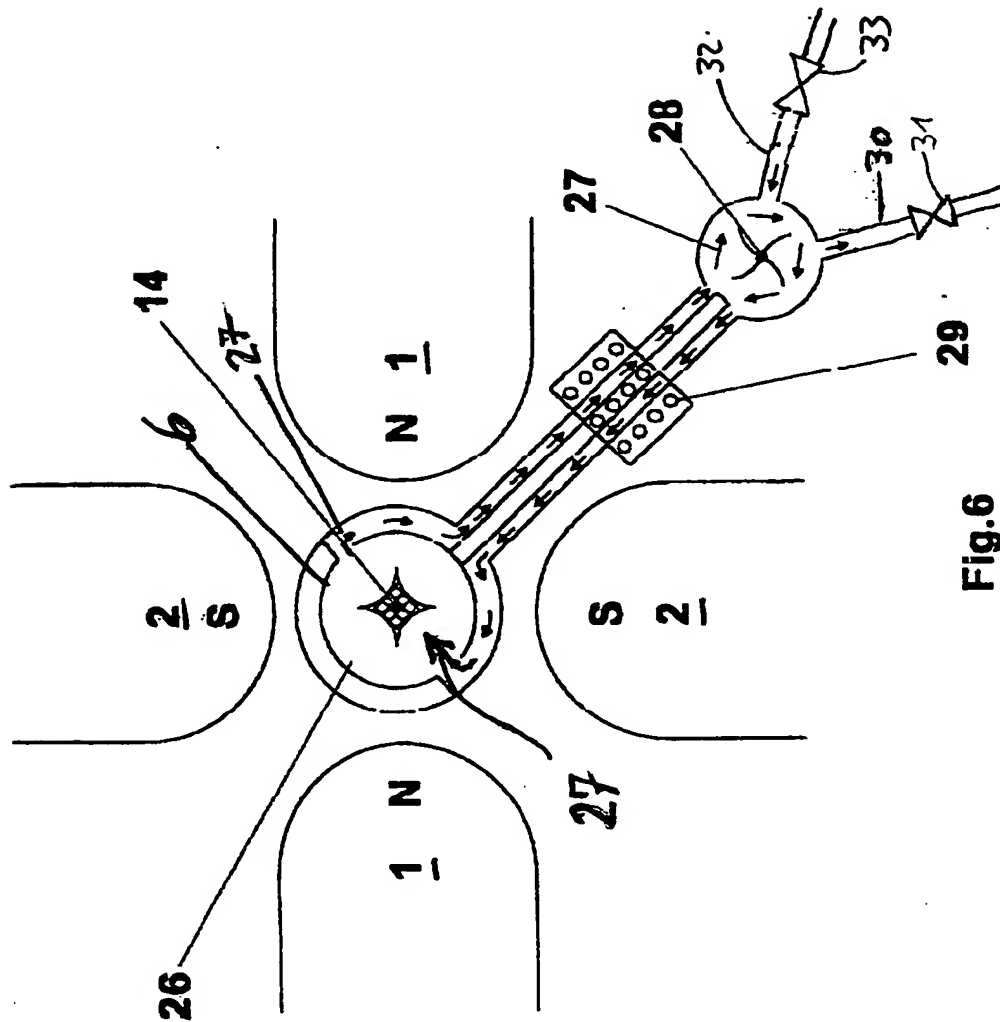


Fig.6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No.

PCT/EP 00/06195

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 H01S3/032 H01S3/0975 //H05H1/14

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H01S H05H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, IBM-TDB

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>PEIYUAN ZHU ET AL: "A new argon-ion laser based on an electrodeless plasma" JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 1 SEPT. 1990, USA, vol. 68, no. 5, pages 1981-1984, XP000159110 ISSN: 0021-8979 Abschnitte I,II,V; Abbildungen 1,2</p>	<p>1,5,20, 25,26, 34,35</p>
A	<p>PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 013, no. 074 (E-717), 20 February 1989 (1989-02-20) & JP 63 255981 A (RIKAGAKU KENKYUSHO), 24 October 1988 (1988-10-24) abstract</p>	<p>1-7,10, 11</p>

Y Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

• Special categories of cited documents :

- *"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *"E" earlier document but published on or after the international filing date
- *"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

20 October 2000

Date of mailing of the international search report

07/11/2000

Name and mailing address of the ISA
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Iasevoli, R

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Int'l. Application No.

PCT/EP 00/06195

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KELLER J H: "Multipole Containment of Laser Plasma" IBM TECHNICAL DISCLOSURE BULLETIN, vol. 22, no. 8A, January 1980 (1980-01), pages 3239-3240, XP002150412 New York, US Seite 3240; Absätze 1,2; Abbildungen 1,2	1-5,7, 10,11
A	US 4 430 290 A (KIRYU YUICHI) 7 February 1984 (1984-02-07) column 2, line 16 - line 38; figure 1	1-6
A	KOBAYASHI S ET AL: "Power enhancement for argon II narrow tube lasers by a transverse magnetic field" APPLIED PHYSICS LETTERS, 15 MAY 1985, USA, vol. 46, no. 10, pages 925-927, XP000760620 ISSN: 0003-6951 the whole document	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 00/06195

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
JP 63255981 A	24-10-1988	JP 1821614 C	10-02-1994
		JP 5031834 B	13-05-1993
US 4430290 A	07-02-1984	JP 1266402 C	27-05-1985
		JP 55030162 A	03-03-1980
		JP 59042960 B	18-10-1984

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 00/06195

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 H01S3/032 H01S3/0975 //H05H1/14

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 H01S H05H

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ, INSPEC, IBM-TDB

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	PEIYUAN ZHU ET AL: "A new argon-ion laser based on an electrodeless plasma" JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 1 SEPT. 1990, USA, Bd. 68, Nr. 5, Seiten 1981-1984, XP000159110 ISSN: 0021-8979 Abschnitte I,II,V; Abbildungen 1,2	1,5,20, 25,26, 34,35
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 013, no. 074 (E-717), 20. Februar 1989 (1989-02-20) & JP 63 255981 A (RIKAGAKU KENKYUSHO), 24. Oktober 1988 (1988-10-24) Zusammenfassung	1-7,10, 11
	— — — — — -/-	



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfindeterischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfindeterischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

20. Oktober 2000

Abesenddatum des internationalen Recherchenberichts

07/11/2000

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Beauftragter

Iasevoli, R

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	KELLER J H: "Multipole Containment of Laser Plasma" IBM TECHNICAL DISCLOSURE BULLETIN, Bd. 22, Nr. 8A, Januar 1980 (1980-01), Seiten 3239-3240, XP002150412 New York, US Seite 3240, Absätze 1,2; Abbildungen 1,2	1-5,7, 10,11
A	US 4 430 290 A (KIRYU YUICHI) 7. Februar 1984 (1984-02-07) Spalte 2, Zeile 16 - Zeile 38; Abbildung 1	1-6
A	KOBAYASHI S ET AL: "Power enhancement for argon II narrow tube lasers by a transverse magnetic field" APPLIED PHYSICS LETTERS, 15 MAY 1985, USA, Bd. 46, Nr. 10, Seiten 925-927, XP000760620 ISSN: 0003-6951 das ganze Dokument	1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Abkürzungszeichen

PCT/EP 00/06195

Im Recherchenbericht angeführtes Patentedokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
JP 63255981 A	24-10-1988	JP 1821614 C	10-02-1994
		JP 5031834 B	13-05-1993
US 4430290 A	07-02-1984	JP 1266402 C	27-05-1985
		JP 55030162 A	03-03-1980
		JP 59042960 B	18-10-1984